

公路路基路面检测中回弹弯沉检测方法及对比实验

汪 昊

桐庐县交通工程勘察设计有限公司 浙江 杭州 311500

摘 要：随着我国公路交通网络的快速扩展，道路工程的耐久性与安全性愈发受到重视，路基路面的结构强度成为保障通行质量的核心要素。本文聚焦公路路基路面回弹弯沉检测，阐述其在反映承载能力、评估结构完整性及指导公路全生命周期管理中的重要性。系统梳理贝克曼梁法、自动弯沉仪法、落锤式弯沉仪法等主流检测方法的技术特点，通过设计对比实验，从检测原理、效率、精度等维度构建分析框架，明确实验参数选取标准与误差控制体系，验证不同方法的数据关联性与适用性。研究旨在为公路工程中回弹弯沉检测方法的科学选择提供理论依据与实践参考，助力提升路基路面检测的准确性与高效性。

关键词：公路路基；路面检测；回弹弯沉；检测方法；对比实验

引言：公路路基路面的结构性能直接关乎交通运行安全与工程寿命，回弹弯沉作为表征其承载能力的核心指标，其检测技术的科学性至关重要。传统检测方法与现代智能化设备并存，因原理差异导致检测结果存在偏差，给工程评价带来挑战。基于回弹弯沉检测的重要性，系统介绍贝克曼梁法、落锤式弯沉仪法等主流技术，通过设计对比实验，分析不同方法在效率、精度、适用场景等方面的特性，建立数据验证与误差控制体系，以期厘清各类方法的优劣，为公路设计、施工及养护中的检测实践提供规范化指导。

1 公路路基路面检测中回弹弯沉检测的重要性

1.1 反映路基路面承载能力

回弹弯沉是路基路面在车辆荷载作用下产生的竖向变形，其数值大小直接反映结构抵抗外荷载的能力。当车辆荷载作用于路面时，路面结构会发生瞬时变形，卸载后能恢复的变形量即为回弹弯沉。该指标与路基土的压实度、基层和面层的强度及刚度密切相关，承载能力越强，回弹弯沉值越小。

1.2 评估路面结构完整性

路面结构完整性是保障公路正常使用的基础，而回弹弯沉检测能有效揭示结构内部的隐藏损伤。路面结构层间的粘结状态、基层的整体性及路基的均匀性等，都会通过回弹弯沉值的分布特征体现。当路面出现裂缝、松散或基层冲刷等病害时，局部结构刚度下降，导致该区域回弹弯沉值显著增大。

1.3 指导公路设计、施工与养护

在公路设计阶段，回弹弯沉检测数据可为结构层厚度设计、材料参数选取提供实测依据，确保设计方案与实际地质条件和交通荷载相匹配。施工过程中，通过对

各结构层回弹弯沉的实时监测，可验证施工质量是否达到设计标准，及时发现压实度不足、材料配比不合理等问题，便于动态调整施工工艺^[1]。

2 公路路基路面检测中回弹弯沉检测的方法

2.1 贝克曼梁法

贝克曼梁法是最早应用于回弹弯沉检测的传统方法，其原理是通过杠杆原理测量路面在标准轴载作用下的回弹变形。该方法所用设备主要包括贝克曼梁、百分表、标准车（通常为后轴重100kN的载重汽车）。检测时，将贝克曼梁的测头置于测点处，标准车缓缓驶至测点位置，使后轮中心对准测点，此时百分表记录初始读数；待车辆驶离后，百分表记录回弹后的读数，两次读数差值即为回弹弯沉值。该方法的优点是设备简单、成本低、操作易于掌握，且检测结果直观，长期以来作为我国公路工程回弹弯沉检测的基准方法。但缺点也较为明显，检测效率低，每测点检测需耗时3-5分钟，且受人为操作影响较大，如百分表读数精度、贝克曼梁放置角度等都会导致误差；同时，检测过程中需封闭部分车道，对交通影响较大，不适用于车流量大的路段。

2.2 自动弯沉仪法

自动弯沉仪法是在贝克曼梁法基础上发展的自动化检测技术，原理是利用多个位移传感器连续测量路面在车辆荷载作用下的弯沉盆数据。设备由测试车、刚性横梁、位移传感器（通常为激光或电测式）、数据采集系统组成，测试车一般采用前轴导向、后轴加载的特制车辆，加载方式模拟标准轴载。检测时，测试车以5-10km/h的速度行驶，刚性横梁两端的测轮接触路面，当后轴荷载作用于测点时，位移传感器实时记录不同位置的弯沉值，数据采集系统自动处理并生成弯沉曲线。其显著

优点是检测效率高,每小时可检测200-500个测点,能实现连续检测,减少对交通的干扰;数据自动化记录降低了人为误差,检测精度较贝克曼梁法有所提升。但设备成本较高,对路面平整度要求较高,若路面存在较大起伏,可能导致测轮跳动影响数据准确性。

2.3 落锤式弯沉仪法

落锤式弯沉仪法(FWD)是一种动态检测方法,原理是通过重锤自由落下产生的瞬时冲击荷载模拟车辆行驶时的动荷载,同时测量路面产生的瞬时弯沉及回弹弯沉。设备主要由承载板、重锤(质量通常为5-30kN)、导向杆、位移传感器阵列(一般6-9个)、数据采集与分析系统组成。检测时,重锤从设定高度落下,通过承载板对路面施加脉冲荷载,荷载作用时间约0.02-0.03秒,位移传感器同步采集不同半径处的弯沉值,形成弯沉盆数据,进而计算回弹弯沉及弯沉盆参数(如弯沉盆半径、曲率半径等)。该方法的优点是能模拟车辆行驶的动态荷载效应,更贴近实际交通荷载作用情况,检测效率较高,每测点检测时间约1分钟,可获取弯沉盆完整数据,为路面结构层力学分析提供更多参数;数据重复性好,误差主要来源于荷载稳定性。但设备体积较大,运输及现场架设较复杂,检测成本高,且对基层刚度较低的路面,冲击荷载可能导致过度变形,影响回弹弯沉的真实性。

2.4 激光弯沉仪法

激光弯沉仪法是利用激光测距技术测量路面弯沉的新型方法,原理是通过激光传感器捕捉路面在荷载作用下的微小位移变化。设备由测试车、激光发射与接收装置、荷载施加系统、数据处理终端组成,荷载施加可采用与自动弯沉仪类似的标准轴载车辆,或集成小型加载装置。检测时,激光发射器向路面发射激光束,接收装置记录初始激光反射位置;当荷载作用于测点时,路面产生沉降,激光反射位置发生偏移,通过计算偏移量得到弯沉值,数据实时传输至终端并生成检测报告。其突出优点是检测速度快,测试车行驶速度可达30-50km/h,能实现高速连续检测,极大减少对交通的影响;激光传感器精度高,可捕捉0.01mm的位移变化,检测分辨率优于传统方法;设备自动化程度高,无需人工干预,数据可直接导入管理系统。但缺点是对环境干扰敏感,如强光、路面积水会影响激光信号接收;设备成本高昂,维护技术要求高,目前主要应用于高速公路大规模快速普查及路面病害早期预警检测。

2.5 便携式落锤弯沉仪法

便携式落锤弯沉仪法是针对现场快速检测开发的轻量化设备,原理与落锤式弯沉仪相同,但采用小型化设

计,通过便携落锤产生冲击荷载,测量路面回弹弯沉。设备由便携式落锤装置(重锤质量通常为5-15kN)、承载板、微型位移传感器(如加速度计或应变片)、手持数据记录仪组成,整体重量仅为传统落锤式弯沉仪的1/5-1/10,可由2-3人搬运。检测时,将承载板放置于测点,落锤从预设高度落下,冲击荷载通过承载板传递至路面,位移传感器记录弯沉随时间的变化曲线,数据经处理后得到回弹弯沉值。其主要优点是便携性强,适用于狭窄路段、桥梁伸缩缝附近等大型设备难以到达的区域;检测效率较高,每测点检测时间约1-2分钟,且无需封闭大面积车道;设备成本低于传统落锤式弯沉仪,便于基层检测单位普及。但受限于小型化设计,冲击荷载较小(通常最大等效轴载为50kN),对高刚度路面的检测灵敏度不足,弯沉值测量范围较窄;数据重复性略低于大型落锤设备,需通过多次检测取平均值提高精度。适用于农村公路检测、路面局部修补后质量验收及大型设备检测盲区的补充检测^[2]。

3 公路路基路面检测中回弹弯沉的对比实验

3.1 实验目的与依据

回弹弯沉作为衡量公路路基路面结构承载能力的核心指标,其检测数据的准确性直接关系到道路结构性能评估、病害诊断及养护方案制定的科学性。本次对比实验旨在通过对不同回弹弯沉检测方法的平行测试,量化分析各方法在检测精度、操作效率及环境适应性上的差异,为工程实践中检测方法的合理选择提供技术支撑。实验严格依据《公路路基路面现场测试规程》(JTGE60-2008)中关于回弹弯沉检测的技术标准,明确贝克曼梁法作为基准方法,与自动弯沉仪法、落锤式弯沉仪法的对比参数,同时参考《公路工程质量检验评定标准》中对数据精度的要求,确保实验过程及结果判定符合行业规范。

3.2 实验目的与依据实验方案设计

3.2.1 检测路段选择

选取城郊二级公路K8+000-K10+000段,全长2km。该路段包含沥青混凝土面层(4-6cm)、水泥稳定碎石基层(20-25cm)及粉质黏土路基,涵盖填方(3-5m)、挖方(2-4m)及桥涵过渡段。通车6年,年均交通量约5000辆/日(标准轴载),路面有轻微裂缝、车辙,能反映中等交通荷载下道路实际状态,满足多方法对比需求。

3.2.2 检测方法选取

选三种主流方法对比:①贝克曼梁法,用5.4m杠杆式梁配合BZZ-100试验车,静态加载,精度高但需断交,单测点耗时约5分钟;②自动弯沉仪法,拖挂式激光设

备, 5km/h连续检测, 单测点10秒, 适合大面积筛查;
③FWD法, 100kN冲击荷载模拟行车, 环形传感器采弯沉盆数据, 单测点30秒, 反映动态响应。同路段设30个重合测点, 间距50m, 确保对比有效。

3.3 实验过程与数据采集

3.3.1 贝克曼梁法

检测前校准贝克曼梁百分表, 精度需达0.01mm。试验车停于测点旁, 使后轮中心距测点5cm内。将梁支点置于测点两侧3m处, 测头抵住测点路面, 安装百分表。加载后待指针稳定, 读取最大读数; 卸载稳定后读残余值, 计算回弹弯沉。每个测点重复3次, 取平均值, 同步记录路面温度、天气及试验车轴载参数。

3.3.2 自动弯沉仪法

检测前校准激光传感器与位移系统, 确保误差 $\leq 0.02\text{mm}$ 。将设备拖挂于试验车后, 调试至水平状态。以5km/h匀速行驶, 通过电脑控制系统触发数据采集, 每50m对应1个测点, 连续记录弯沉值及行驶轨迹。每检测1km停车校准一次设备, 记录行驶速度、路面湿度及仪器工作电压, 数据自动存储至硬盘, 事后导出核对。

3.3.3 落锤式弯沉仪法

检测前检查落锤装置, 确保100kN荷载误差 $\leq 2\%$ 。将承载板对准测点, 调整传感器阵列覆盖弯沉影响范围。启动设备, 落锤自由下落冲击承载板, 同步记录各传感器弯沉数据, 形成弯沉盆曲线。每个测点冲击3次, 间隔30秒, 取后两次有效值平均。记录冲击时间、落锤高度及环境温度, 数据实时传输至终端, 生成弯沉报告初稿。

3.4 数据处理与对比分析

3.4.1 数据修正

依据《公路路基路面现场测试规程》对原始数据修正: 贝克曼梁法按公式进行温度修正, 沥青路面温度每偏离 $20^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$, 弯沉值需乘以对应修正系数; 自动弯沉仪法采用仪器标定曲线修正系统误差, 消除行驶速度波动影响; 落锤式弯沉仪法将动态弯沉值换算为等效静态弯沉, 参考荷载-弯沉关系曲线修正冲击能量偏差。所有

数据剔除3倍标准差外的异常值, 保留3位有效数字, 确保修正后的数据具备横向可比性。

3.4.2 结果对比

以贝克曼梁法结果为基准, 计算其他方法的相对偏差: 自动弯沉仪法平均偏差为 $-3.2\%\sim +4.5\%$, 在连续检测路段偏差较稳定; 落锤式弯沉仪法平均偏差为 $+5.8\%\sim +8.1\%$, 动态响应显著路段偏差放大。绘制弯沉值分布曲线, 显示三种方法在基层强度均匀段趋势一致, 在路基不均匀段偏差离散度增大。统计分析表明, 三种方法在95%置信区间内的相关性系数达0.89以上。

3.4.3 误差来源分析

系统误差: 贝克曼梁支点变形引入 $\pm 0.02\text{mm}$ 误差, 自动弯沉仪激光传感器温漂影响 $\pm 0.03\text{mm}$, 落锤式弯沉仪荷载波动导致 $\pm 1.2\%$ 偏差。操作误差: 人工读数反应时滞使贝克曼梁法产生 $\pm 5\%$ 偏差, 自动弯沉仪行驶轨迹偏移影响测点对准度。环境误差: 风力 ≥ 3 级时贝克曼梁读数波动 $\pm 0.04\text{mm}$, 高温时段沥青路面蠕变使自动弯沉仪数据偏大 $10\%\sim 15\%$, 综合误差中环境因素占比约40%, 仪器精度占比35%, 操作因素占比25%^[3]。

结束语

本次回弹弯沉检测方法及对对比实验, 系统对比了贝克曼梁法、自动弯沉仪法与落锤式弯沉仪法的性能。结果表明, 传统方法精度高但效率低, 自动化方法更适配大规模检测, 动态法能反映荷载响应差异。实验为不同场景下方法选择提供依据, 后续可结合更多路况深化研究, 推动检测技术优化, 为道路养护决策提供更精准的数据支撑, 助力公路工程质量与寿命提升。

参考文献

- [1]杨露.公路路基路面检测中回弹弯沉检测方法的应用研究[J].黑龙江交通科技,2020(11):26-27.
- [2]毛海鱼.浅议路基路面回弹弯沉检测中存在的问题[J].公路交通技术,2022(5):6-10.
- [3]施迎风.公路路基路面检测中回弹弯沉检测方法的运用[J].中外建筑,2022(2):119-120.